



**HAL**  
open science

## Vers le diagnostic du comportement des barrages

Emilie Masse, Corinne Curt, Marc Le Goc

► **To cite this version:**

Emilie Masse, Corinne Curt, Marc Le Goc. Vers le diagnostic du comportement des barrages. 16e Congrès de Maîtrise des Risques et de Sécurité de Fonctionnement, Oct 2008, Avignon, France. pp.1-8. hal-02591005

**HAL Id: hal-02591005**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02591005v1>**

Submitted on 12 Feb 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# VERS LE DIAGNOSTIC DU COMPORTEMENT DES BARRAGES

## TOWARDS THE DAM BEHAVIOUR DIAGNOSTIC

Emilie MASSE, Corinne CURT  
Cemagref  
Unité Ouvrages Hydrauliques et Hydrologie  
3275 Route de Cézanne  
CS 40061  
13182 Aix-en-Provence CEDEX 5 – France  
tel : 04.42.66.99.80  
emilie.masse@cemagref.fr, corinne.curt@cemagref.fr

Marc LE GOC  
LSIS Laboratoire des sciences de l'information et des systèmes –III  
UMR CNRS 6168  
Université Paul Cézanne Aix-Marseille III  
Avenue Escadrille Normandie Niemen  
13397 Marseille Cedex 20 – France  
tel : 04.91.05.60.66  
marc.legoc@lsis.org

### Résumé

La prévision du comportement des barrages joue un rôle important dans la maîtrise de la sécurité des ouvrages. Elle consiste en la détection et le contrôle des mécanismes de dégradations. Ce papier présente une méthodologie multi modèle basée sur des observations datées, appelé TOM4D. L'objectif est de modéliser des systèmes dynamiques tels que les barrages afin d'en proposer un diagnostic et de prévoir leur comportement. L'idée de base consiste à utiliser le même niveau d'abstraction que celui des experts dans le but de réduire le nombre de composants à diagnostiquer et ainsi de faciliter le diagnostic. Ainsi, le processus à diagnostiquer est défini suivant quatre modèles principaux : (1) un modèle de perception qui spécifie le processus comme une relation entre les variables et un ensemble de contraintes sur les valeurs des variables du processus, (2) un modèle structurel qui décrit les relations entre les composants du processus, (3) un modèle fonctionnel qui décrit les relations entre les valeurs des variables du processus (i.e. des fonctions mathématiques) et (4) un modèle comportemental qui décrit les états du système et les événements discrets initiant les transitions d'état. Ces quatre modèles contiennent la connaissance fondamentale du processus. Ils sont développés à partir d'une base de connaissances contenant l'histoire du vieillissement du processus transformable en scénarios décrits en termes d'événements. Ces quatre modèles sont les principaux modèles de la méthode TOM4D. Cette méthode, visant à produire des modèles génériques du processus, est basée sur la connaissance utilisée par les experts et leur niveau d'abstraction. Ce papier présente les modèles génériques obtenus dans le cas d'un barrage en remblai ainsi qu'un bref aperçu de l'utilisation de ces modèles pour diagnostiquer et prévoir le comportement du barrage. Ceci illustre l'aide qu'apporte l'utilisation de cette méthode aux exploitants, bureaux d'études et experts pour la maîtrise de la sécurité des ouvrages hydrauliques.

### Summary

Forecasting dam behaviour is of paramount importance to avoid collapses. It consists of detecting and controlling deterioration mechanisms. This paper sets out to propose a multi model methodology based on dated observation called TOM4D. The objective is to model dynamic systems, such as dams and to diagnose it. The main idea is to use the same level of abstraction that the Experts in order to reduce the component number to diagnose. This facilitates the diagnosis task. To this aim, the process to be diagnosed is defined with four main models: (1) a perception model that specifies the process as a relation between variables and a set of constraints about the values of process variables, (2) a structural model that describes the relations between the components of the process, (3) a functional model that describes the relations between the values of the process variables (i.e. the functions) and (4) a behavioural model that describes the system states and the discrete events firing the state transitions. These four models contain the fundamental knowledge about the process. They are developed from a knowledge base telling the ageing stories of the process that is to say from scenarios described in terms of events. These four models are used in the TOM4D method aiming at producing some generic models. This method is based on knowledge used by experts and their level of abstraction. This paper shows the obtained generic models about an embankment dam. Using of these models is get onto showing a first overview of using this model to diagnose and forecast the behavior of dam. This explain how using of this method may help the actors in charge of hydraulic engineering to control and diagnose dam.

### Introduction

La maîtrise de la sécurité est une des préoccupations majeures des exploitants, des propriétaires et des concepteurs de barrages. Elle revêt un caractère essentiel, la rupture de ces ouvrages étant susceptible d'entraîner des conséquences économiques et humaines dramatiques. Le contrôle de la sécurité consiste à détecter et à maîtriser les mécanismes de dégradation pouvant entraîner la rupture de l'ouvrage si aucune action n'est entreprise (maintenance, confortement, vidange d'urgence...). Ces dégradations sont provoquées par un ensemble de processus dynamiques plus ou moins dépendants tels que le colmatage, l'érosion interne ou le glissement, qui ont des origines diverses et souvent multiples.

A l'heure actuelle, la sécurité des barrages est évaluée au travers d'expertises menées sur les ouvrages par des experts. Celles-ci ont pour but d'analyser le comportement du barrage et de proposer des actions correctives visant à maintenir les ouvrages en état c'est-à-dire à limiter les mécanismes de dégradation et à éviter les ruptures. Un expert qui a étudié de manière approfondie de nombreux cas, est capable (i) d'analyser un ensemble de données provenant de modèles mécaniques, données d'auscultation, observations visuelles, données de conception ou de réalisation, (ii) de comprendre le comportement d'un nouvel ouvrage et (iii) d'établir un diagnostic grâce à ses connaissances théoriques et ses connaissances heuristiques. Nous proposons par ce travail de venir en aide aux exploitants, bureaux d'études et experts en développant un outil d'aide au diagnostic.

Ce travail s'inscrit dans le cadre de la conception d'un système de diagnostic à bases de connaissances pour l'aide à la maîtrise de la sécurité de processus tel que les barrages hydrauliques. L'approche procède en deux temps : la proposition d'une méthode de modélisation amenant à la modélisation du comportement du barrage puis un algorithme de diagnostic. Les travaux présentés dans ce papier sont principalement axés sur le premier point. Ils développent une méthode de modélisation [5] et [6] combinant une approche conceptuelle de type CommonKads [11] à une approche multi modèle s'inspirant de celle présentée dans [1] que l'on contraint au cadre général de l'Approche Stochastique de [3] ainsi qu'au cadre conceptuel de modélisation de [11]. La méthodologie CommonKADS, d'utilisation classique dans le domaine du management des connaissances permet l'analyse de corpus de connaissance, l'acquisition de connaissance et le développement de système à base de connaissance. La combinaison de CommonKads à une approche multi modèle vise à expliciter les

modèles utilisés par les experts lors des tâches de raisonnement de diagnostic. Ces modèles présentent l'intérêt d'être basés à un niveau d'abstraction conduisant, à notre sens, à des modèles dont le niveau de granularité permettra un raisonnement de diagnostic efficace et sûr.

## Présentation de la méthode TOM4D

Ce papier présente la méthode de modélisation TOM4D (Timed Observation Modeling for Diagnosis). Elle vise à produire à partir d'un enchaînement d'observations datées et de connaissances expertes a priori, des modèles permettant de réaliser une tâche de diagnostic de système dynamique. Ces modèles construits à partir des connaissances fournies par des experts (connaissances heuristiques et théoriques) et en utilisant leur niveau d'abstraction, permettent d'explicitier les modèles implicites sur lesquels les experts raisonnent lors des tâches de diagnostic. Ainsi, ces modèles ont pour vocation à aider les exploitants, les bureaux d'études et les experts à mieux contrôler et diagnostiquer le comportement des ouvrages hydrauliques.

La méthode TOM4D est basée sur l'analyse des observations datées. Trois principales contraintes guident le développement de la méthode. En effet, le formalisme de modélisation doit être compatible avec :

- le cadre de l'approche stochastique permettant de découvrir la connaissance temporelle à partir de données datées [4]. Ce cadre définit un événement  $e_i$  comme un couple  $(x_i, \delta_i)$  où  $x_i$  est une variable et,  $\delta_i$  la valeur associée. Une occurrence d'événement  $e_i$  est un triplet  $(t_k, x_i, \delta_i)$  correspondant à l'affectation d'une valeur  $\delta_i$ , à une variable  $x_i$ , à l'instant  $t_k$  :  $x_i(t_k) = \delta_i$  ;
- l'algorithme de diagnostic de Reiter [8] qui propose de définir un système observé comme un triplet  $\{SD, COMP, OBS\}$  où  $\{SD, COMP\}$  est un système et OBS est un ensemble d'observation. Le doublet  $\{SD, COMP\}$  définit le système où SD (description du système) est un ensemble de formule de la logique des prédicats du premier ordre avec des égalités qui décrivent le fonctionnement normal du système, et COMP représente le système de composants qui est un ensemble fini de constantes. OBS représente l'ensemble des observations faites sur le système lors de son fonctionnement. Lorsque les observations diffèrent du comportement attendu, un diagnostic doit être établi pour déduire la cause et donc les composants responsables du dysfonctionnement.
- le cadre conceptuel de modélisation de [11] induisant qu'un processus peut être modélisé suivant trois axes : structurel, fonctionnel, comportemental. Le cadre conceptuel de modélisation impose l'utilisation de trois modèles :
  - un modèle structurel (MS) du processus  $P(t)$  qui décrit les relations entre les composants  $c_i$  du système ainsi que les relations entre les composants  $c_i$  et les variables  $x_i$  du processus  $P(t)$ ;
  - un modèle fonctionnel (MF) du processus  $P(t)$  qui décrit les relations entre les valeurs  $\delta_i$  des variables  $x_i$  par des fonctions  $F_i$ . Ces fonctions sont données sous forme de table de valeurs. Le modèle fonctionnel spécifie les relations entre les variables mais ne donne aucune indication sur la notion de valeur normale ou anormale. Ces propriétés sont déduites à partir du modèle comportemental (MC) ;
  - un modèle comportemental (MC) du processus  $P(t)$  qui décrit ces modes opératoires comme un ensemble d'état et de classes d'événements discrets initiant les transitions d'état. Chaque état est défini par un ensemble de valeurs uniques attribuées à l'ensemble de variables. Chaque classe d'événements discrets  $C^i$  dans ce contexte ne contient qu'un événement  $e_i$  qui correspond à une observation à une date (i.e. l'attribution d'une valeur  $\delta_i$  à une variable  $x_i$  à l'instant  $t$ ) que l'on peut noter  $C^i = \{e_i\} = \{(x_i = \delta_i)\}$ .

La méthode TOM4D comporte trois principales étapes de modélisation dont l'objectif est de construire un modèle générique adéquate au diagnostic à partir de connaissances et données disponibles (cf. Figure 1) : (1) l'interprétation de la connaissance, (2) la définition du processus, (3) la modélisation générique. Les trois modèles présentés ci-dessus sont principalement utilisés lors des étapes 1 et 3 pour modéliser la connaissance disponible au même niveau d'abstraction que celui utilisé par les experts dans leur tâche de diagnostic.

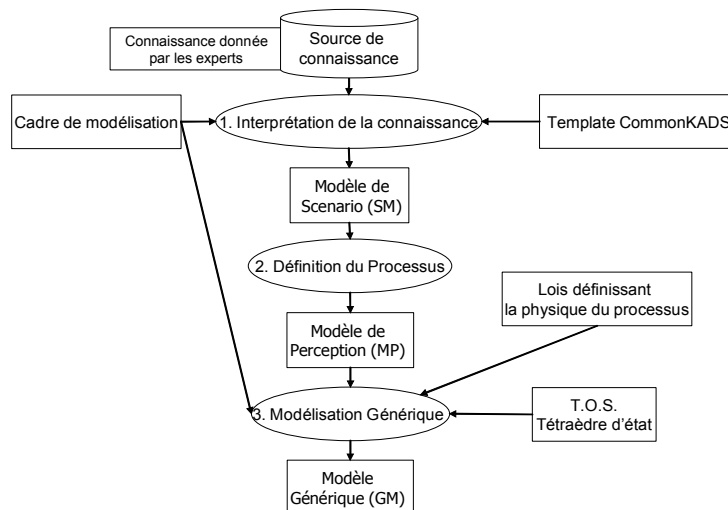


Figure 1. Processus de modélisation TOM4D

Ce papier illustre les étapes du processus de modélisation TOM4D à travers une application sur un processus réel : le barrage de Cublize (69) qui a été diagnostiqué par les experts du Cemagref s'occupant de la sécurité des barrages hydrauliques intéressant la sécurité publique. La base de connaissance [7] relative à ce barrage en remblai homogène contient une coupe du barrage identifiant ses principaux composants et leur positionnement, un texte et des courbes explicitant le diagnostic et décrivant l'évolution des mécanismes d'érosion interne de vieillissement de cet ouvrage sur une période de dix années.

## L'interprétation de la connaissance

La première étape de modélisation : *Interprétation de la connaissance*, vise à représenter le processus dans un cadre conceptuel de type systémique [10] permettant d'obtenir trois modèles, un Modèle Structurel (MS), un Modèle Fonctionnel (MF) et un Modèle Comportemental (MC) qui composent ce que l'on appelle le modèle de scénarios du processus noté  $SM(\omega) = \langle MS(\omega), MF(\omega), MC(\omega) \rangle$ . Ce modèle de scénarios est cohérent avec le scénario relatif à la base de connaissances. Cette étape d'interprétation de la connaissance utilise la méthode CommonKads [10] comme template pour interpréter et organiser la connaissance disponible sur le processus. Ce template représente une grille d'interprétation des connaissances (cf. Figure 2) qui permet d'interpréter, de classer la connaissance suivant les différents concepts et suivant leur rôle mais aussi d'acquérir de nouvelles connaissances en cas de besoin.

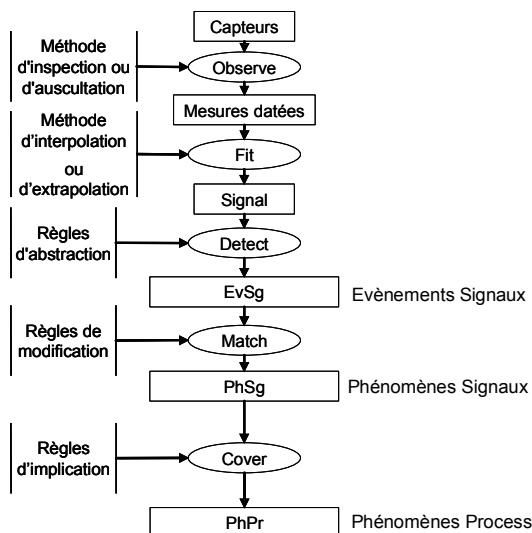


Figure 2. Grille d'interprétation de la connaissance

Cette grille de lecture permet d'identifier les termes employés dans la base de connaissances sous la forme de « capteurs » représentant les composants du système, « mesures datées », « interprétations des signaux » (PhSg) et « phénomènes » (PhPr). De plus, cette analyse a mis en valeur deux types de règles :

- les unes  $R_{PhSg}$  qui permettent d'accéder à l'interprétation des signaux à partir des mesures datées et ordonnées (courbes des données instrumentales). « Si il y a une modification significative (franchissement d'un seuil, pente de la courbe...) pour des mesures datées ordonnées formant une courbe alors PhSg » ; par exemple : Si « la courbe de pression du capteur C3  $\geq$  cote du drain » alors « PhSg1 » ;
- les autres  $R_{PhPr}$  qui permettent la détection de phénomènes à partir de l'interprétation des signaux des instruments d'auscultation par exemple. Elles sont de la forme « Si PhSg alors PhPr » ; ainsi : Si « Pression interstitielle sur C3  $\geq$  cote du drain (PhSg1) » alors « Sous pression dans le Remblai Amont (PhPr2) ».

La base de connaissances (recueil d'expertise) contenant l'ensemble des documents relatifs aux barrages permet de reconstruire l'histoire du vieillissement du barrage et de la traduire en termes d'événements c'est-à-dire sous forme de scénarios. Le scénario noté  $\omega = \{x_i(t_0) = \delta_i, \dots, x_i(t_n) = \delta_i\}$  décrit donc l'évolution d'un processus suivant à un enchaînement de mesures datées (cf Figure 3).

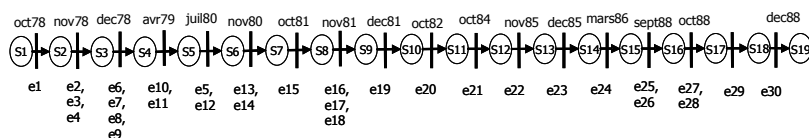


Figure 3. Histoire de vieillissement traduit en terme d'évènements discrets

La grille d'interprétation de la connaissance permet donc de mettre en valeur la liste de mesures datées (mdi) dont un extrait est présenté (cf Figure 4). Pour chaque capteur est associée une valeur à une date. L'ensemble des valeurs relevées aux différentes dates pour un même capteur forme un signal. L'étude de ces signaux révèle des « événements signaux » c'est-à-dire des augmentations des diminutions. Lorsque ces événements sont remarquables, ils sont appelés « phénomènes signaux » et sont interprétés par les experts en terme de « phénomènes signaux ».

- md1 : Capteur visuel du niveau d'eau, 433, nov78
- md2 : Capteur de pression de C3, 436, nov78
- md3 : Capteur de pression de C4, 427.5, nov78
- md4 : Capteur de Débit D1, 0.75, juil80
- md5 : Capteur de pression de C3, 436, dec78
- md6 : Capteur de pression C4, 428, dec78
- md7 : Capteur de pression de C4, 430.5, juin79
- md8 : Capteur de pression de C3, 437.5, sept80
- md9 : Capteur de Débit D1, 1.25, nov80

Figure 4. Extrait de la liste de mesures datées

Cette première étape permet de produire, à partir de la base de connaissances relative à l'historique de vieillissement du barrage en remblai de Cublize, trois modèles composant le modèle de scénarios  $SM(\omega) = \langle MS(\omega), MF(\omega), MC(\omega) \rangle$  qui sont présentés dans [6].

**Modèle structurel**

L'analyse de la coupe du barrage et de la base de données permet de construire le modèle structurel (Figure 5) composé de 7 composants du barrage et 8 capteurs. Il décrit la structure du processus à partir des composants et de leurs interconnexions représentant les relations géométriques entre ces structures dans le système. Les capteurs C3, C4 et C5 sont des piézomètres, D1 est un capteur de débit de drainage. Les indicateurs Zone humide, Eau chargée et Glissement sont issus de l'observation.

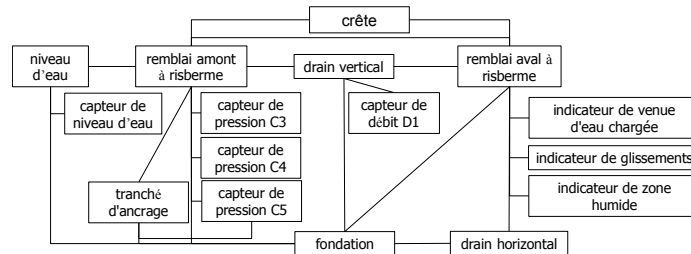


Figure 5. Modèle Structurel du barrage de Cublize

**Modèle comportemental**

Le scénario de vieillissement du barrage permet de définir l'ensemble des événements discrets  $e_i = (x_i, \delta_i)$  initiant les transitions d'état et de caractériser l'ensemble des états. La transition d'état  $t_{ij} \equiv (s_i, s_j, e_i)$  où  $s_i$  est l'état amont,  $s_j$  l'état aval et  $e_i$  est un événement discret représente le changement qui s'opère entre deux états  $s_i$  et  $s_j$  par l'occurrence de  $e_i$ . L'ensemble des transitions d'état et les états associés permettent de construire le modèle comportemental (cf Figure 6).

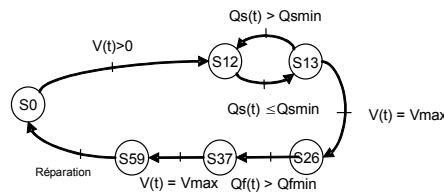


Figure 6. Modèle Comportemental du barrage de Cublize

**Modèle fonctionnel**

Il est possible d'associer à chaque état une fonction de calcul des valeurs des variables dont la valeur change avec l'état à partir de la caractérisation des états et de deux principes ci dessus :

- une transition (entre deux états) est provoquée par l'affectation d'une nouvelle valeur à au moins une variable ;
- les valeurs des variables sont déterminées par des fonctions.

Une fonction entre des variables est identifiée à chaque changement de valeur. Ainsi le modèle fonctionnel et les tables de valeur associées peuvent être déduites (cf Figure 7).

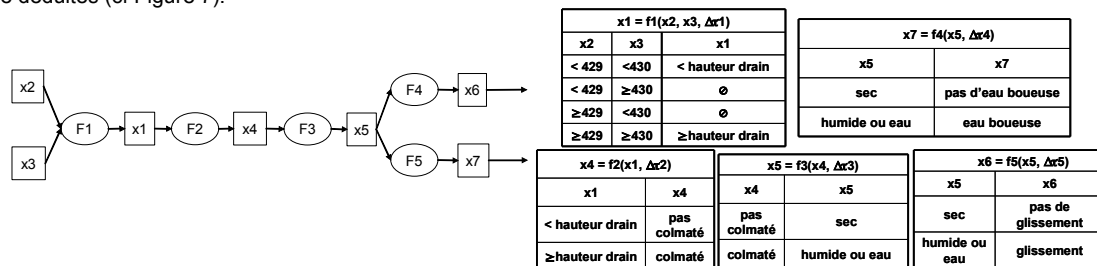


Figure 7. Modèle Fonctionnel du barrage de Cublize et ses tables de valeur

**Définition du processus**

La deuxième étape : *définition du processus*, vise à définir le modèle de perception (MP) à partir du modèle de scénarios et de la connaissance disponible. Les modèles  $MS(\omega)$ ,  $MF(\omega)$  et  $MC(\omega)$  du modèle de scénarios  $SM(\omega)$  permettent de définir le processus  $P(t)$  sous la forme d'une relation  $P(t) = \text{Rel}(x_1(t), x_2(t), x_3(t))$  entre des variables qui permettent de déduire un ensemble de limites physiques et informationnelles (i.e. son périmètre) et de contraintes d'exploitation de ce processus : ces connaissances permettent la construction du modèle de perception (MP).

Ainsi, le barrage de Cublize est perçu après la première étape, comme un processus hydraulique  $P(t)$  reliant trois variables : un volume  $V(t)$ , un débit contrôlé (drain)  $Q_s(t)$  et un débit non contrôlé  $Q_f(t)$  (cf. Figure 8). Les constantes associées sont des valeurs seuils associées à chacune des variables :  $Q_{smin}$ ,  $Q_{smax}$ ,  $Q_{fmin}$ ,  $Q_{fmax}$ ,  $V_{min}$ ,  $V_{max}$ . Les propositions relatives au fonctionnement du processus  $P(t)$  sont les suivantes :

- Le but de la conduite du processus : maintenir la sécurité :  $\forall t, Q_f(t) \leq Q_{fmin}$ ,
- Les contraintes de fonctionnement normal du processus
  - $\exists t_i, \forall t < t_i, V(t) = V_{min} \wedge Q_s(t) = Q_{smin} \wedge Q_f(t) = Q_{fmin}$
  - $\exists t_i, \forall t \geq t_i, V_{max} > V(t) > V_{min} \wedge Q_{smax} > Q_s(t) > Q_{smin} \wedge Q_f(t) = Q_{fmin}$
- Les contraintes de fonctionnement anormal du processus
  - $\exists t_j > t_i, \forall t! \geq t_j, Q_s(t) \leq Q_{smin}$  (Colmatage)
  - $\exists t_j > t_i, \forall t! \geq t_j, Q_s(t) \geq Q_{smax}$
  - $\exists t > t_i, Q_f(t) > Q_{fmin}$  (Fuite non contrôlée)

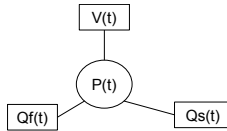


Figure 8. Modèle de perception

### Modélisation générique du processus

L'objectif de l'étape de modélisation générique du processus est de déduire à partir du modèle de perception et du tétraèdre d'état (TOS) [9] instancié au domaine hydraulique (cf. Figure 9a) un modèle générique tripartite  $GM(P(t)) = \langle MS(P(t)), MF(P(t)), MC(P(t)) \rangle$  relatif non plus à un scénario mais au processus  $P(t)$ . Le modèle de perception MP et le TOS-Hydraulique permettent de définir la structure du processus générique qui contraint la construction des modèles structurel, fonctionnel et comportemental du processus.

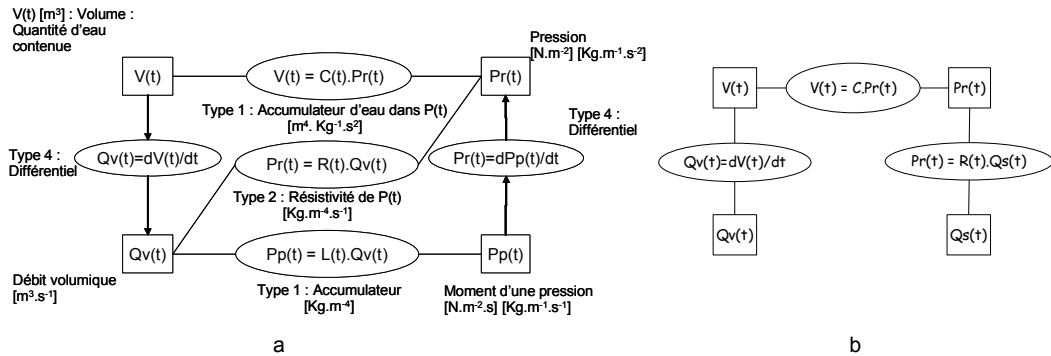


Figure 9. (a) TOS instancié à l'hydraulique et (b) modèle de relation entre variables

Le TOS permet d'identifier l'ensemble de relations théoriques appelées équations généralisées à partir de variables généralisées  $V(t)$ ,  $Pr(t)$ ,  $Q_v(t)$  et  $P_p(t)$ . Ces équations généralisées sont communes à une grande majorité des théories physiques. On retrouve ainsi la loi de Darcy entre  $Q_v(t)$  et  $Pr(t)$  et la loi de Bernoulli entre  $V(t)$  et  $Pr(t)$ .

### Modèle structurel

Le tétraèdre d'état (TOS) instancié au domaine hydraulique fournit une dimension physique de chaque variable caractérisant le processus « barrage » et une interprétation des relations liant les variables entre elles (cf. Figure 8b) ce qui produit de la connaissance qui peut alors être modélisée. Ainsi, à partir du modèle de perception (MP) et du tétraèdre d'état (TOS) instancié au domaine hydraulique, la structure du processus « barrage générique »  $P(t)$  est défini (cf. Figure 10) comme un « verre à fond perméable » : un tube de longueur finie et de capacité constante  $C(t)=C$ , bouché en partie basse par un bouchon perméable de résistivité variable  $R(t)$ , contenant une colonne d'eau dont le volume est  $V(t)$ . Ce modèle est une représentation « analogique » d'un barrage en remblai du point de vue des mécanismes de dégradation étudiés dans le cas de Cublize.  $R(t)$  présentée sur la Figure 5, correspond à l'inverse de la perméabilité et évolue au cours du temps mais n'est presque pas mesurable.  $R(t)$  sera faible dans le cas d'un drain fonctionnant correctement et forte dans le cas d'un masque amont en état parfait. Dans la figure 9b, la relation entre  $V(t)$  et  $Q_s(t)$  est en fait réalisée par la pression  $Pr(t)$ . Ainsi, même si l'ensemble des variables est  $\{V(t), Q_s(t), Q_f(t), Pr(t), R(t)\}$ , d'après les contraintes qui découlent du modèle de scénarios seules trois variables semblent nécessaires pour modéliser le barrage. Il est donc caractérisé par  $\{V(t), Q_s(t), Q_f(t)\}$  qui forme ce qu'on appellera le vecteur d'état  $X(t) = \{V(t), Q_s(t), Q_f(t)\}$ .

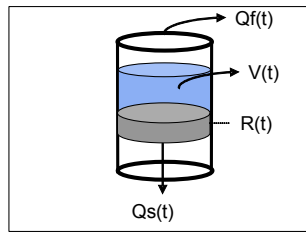


Figure 10. Modèle structurel (verre à fond perméable)

Une instrumentation générique du processus est associée au vecteur d'état  $X(t)$  du processus et positionnée par rapport au modèle structurel (MS) : un capteur mesure le débit  $Q_s(t)$  de sortie par le bouchon perméable, un capteur mesure le débit  $Q_f(t)$  de trop plein dans le tube et un capteur du volume de la colonne d'eau mesure  $V(t)$ . L'instrumentation générique est positionnée suivant les relations entre les composants du MS et les valeurs des variables. Des capteurs additionnels peuvent être ajoutés comme par exemple un capteur de pression au niveau du bouchon. Ces capteurs génériques sont renseignés par des indicateurs visuels, auscultés, calculés et de conception/réalisation [2] : par exemple,  $Q_s(t)$  est évalué par l'indicateur « Débit de drainage »,  $V(t)$  par l'indicateur « Piézométrie »...

### Modèle comportemental

A partir de l'ensemble de constantes ( $Q_{smin}$ ,  $Q_{smax}$ ,  $Q_{fmin}$ ,  $Q_{fmax}$ ,  $V_{min}$ ,  $V_{max}$ ) qui composent le modèle de perception, un ensemble de plages attribuées à chacune des variables est défini. Ces plages définissent (cf. Tableau 1) :

- pour le modèle fonctionnel : l'ensemble des valeurs  $\delta_i$  attribuable à chacune des variables  $x_i$  ce qui correspond à  $\{0, 1, 2\}$  pour les variables  $V(t)$  et  $Q_s(t)$  et  $\{0, 1\}$  pour la variable  $Q_f(t)$  ;
- pour le modèle comportemental : l'ensemble des classes  $C^i$  d'événements discrets  $e_i = (x_i, \delta_i)$  (i.e. l'ensemble des événements discrets  $e_i = (x_i, \delta_i)$  initiant les transitions d'état). On obtient 8 événements discrets :  $e_1 = (V(t), 0)$ ,  $e_2 = (V(t), 1)$ ,  $e_3 = (V(t), 2)$ ,  $e_4 = (Q_s(t), 0)$ ,  $e_5 = (Q_s(t), 1)$ ,  $e_6 = (Q_s(t), 2)$ ,  $e_7 = (Q_f(t), 0)$ ,  $e_8 = (Q_f(t), 1)$

Variables	Constantes	Plages	Correspondances	En termes barrage	Evènements
V(t)	Vmax, Vmin	$V(t) < V_{min}$	0	Ligne de saturation < normale	$e_1 = (V(t), 0)$
		$V_{min} < V(t) < V_{max}$	1	Ligne de saturation = normale	$e_2 = (V(t), 1)$
		$V(t) > V_{max}$	2	Ligne de saturation > normale	$e_3 = (V(t), 2)$
Qs(t)	Qsmax, Qsmin	$Q_s(t) < Q_{smin}$	0	Débit de drainage < normale	$e_4 = (Q_s(t), 0)$
		$Q_{smin} < Q_s(t) < Q_{smax}$	1	Débit de drainage = normale	$e_5 = (Q_s(t), 1)$
		$Q_s(t) > Q_{smax}$	2	Débit de drainage > normale	$e_6 = (Q_s(t), 2)$
Qf(t)	Qfmin	$Q_f(t) < Q_{fmin}$	0	Pas de fuite sur le remblai aval	$e_7 = (Q_f(t), 0)$
		$Q_f(t) > Q_{fmin}$	1	Fuites sur le remblai aval	$e_8 = (Q_f(t), 1)$

Tableau 1. Tableau des événements

Comme nous l'avons déjà vu, un état est défini par un ensemble de combinaisons uniques attribuées à l'ensemble de variables caractérisant les états. Cet ensemble de combinaisons correspond à l'ensemble des états possibles. A partir des plages définies pour l'ensemble des variables, il est alors possible de lister toutes les combinaisons de plages pour l'ensemble des variables caractérisant l'état du processus que l'on appelle vecteur d'état. Ainsi, on a 3 variables avec 3 plages pour  $V(t)$  et  $Q_s(t)$  et 2 plages pour  $Q_f(t)$ , il y a donc  $2 \times 3 \times 3 = 18$  états. Les lois définissant la physique du processus, le TOS et le modèle structurel mettent en valeur des états inaccessibles ce qui permet de réduire le nombre d'état à 10. A partir de ces 10 états, on peut remplir trois matrices qui permettent d'identifier les successions temporelles possibles :

- une matrice événement\*événement  $E = [e_{ij} = (e_i, e_j)]$  qui définit les relations de successions possibles entre les événements  $e_i$  ;
- une matrice état\*état  $X = [x_{ij} = (x_i, x_j)]$  qui définit les transitions possibles entre deux états  $X_i$  ;
- une matrice état\*événement  $X \times E = [(X_i, e_i)]$  qui définit les événements pouvant provoquer une transition d'état. Elle est remplie à partir des deux autres matrices.

Ces matrices sont renseignées en identifiant les relations de successions impossibles entre états et/ou événements. Elles traduisent les lois définissant la physique du processus, comme par exemple l'impossibilité d'observer à l'établissement du régime permanent du barrage  $Q_f(t) > 0$  si  $V(t) = 0$ .

Les deux premières matrices événement\*événement  $E = [e_{ij} = (e_i, e_j)]$  et état\*état  $X = [x_{ij} = (x_i, x_j)]$  permettent de construire la troisième état\*événement  $X \times E = [(X_i, e_i)]$  qui est la représentation matricielle du graphe d'état c'est-à-dire du modèle comportemental générique MC(P(t)) (cf. Figure 11).

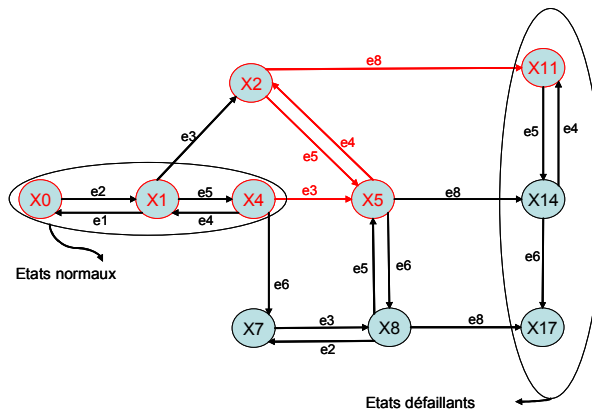


Figure 11. Modèle comportemental

Chaque vecteur d'état  $\{V(t), Qs(t), Qf(t)\}$  correspond à un état du barrage. Ainsi :

- $X0 = \{0,0,0\}$  correspond à un barrage vide ;
- $X1 = \{1,0,0\}$  représente un barrage en cours d'établissement de la ligne de saturation correspondant au régime permanent ;
- $X2 = \{2,0,0\}$  : un barrage dont le système de drainage ne draine pas (possibilité de colmatage) ;
- $X4 = \{1,1,0\}$  : un barrage en fonctionnement dit normal (i.e. la ligne de saturation a atteint son niveau correspondant au régime permanent) ;
- $X5 = \{2,1,0\}$  : un barrage dont la ligne de saturation est supérieure à la normale ;
- $X7 = \{1,2,0\}$  : un barrage dont le débit de drainage est supérieur à la normale ;
- $X8 = \{2,2,0\}$  : un barrage dont la ligne de saturation est supérieure à la normale et dont le débit de drainage est supérieur à la normale ;
- $X11 = \{2,0,1\}$  : un barrage dont le système de drainage ne draine plus avec présence d'une fuite sur le remblai aval ;
- $X14 = \{2,1,1\}$  : un barrage dont la ligne de saturation est supérieure à la normale avec une fuite sur le remblai aval ;
- $X17 = \{2,2,1\}$  : un barrage dont la ligne de saturation est supérieure à la normale et dont le débit de drainage est supérieur à la normale avec une fuite sur le remblai aval.

Le passage d'un état du modèle comportemental à un autre (par exemple de  $X0$  à  $X1$ ) se fait par l'observation d'un événement  $e_i$ . Par exemple, l'événement  $e4$  ( $Qs(t)=0 \Rightarrow$  débit de drainage devient nul) provoque une transition du vecteur d'état  $X5$  à  $X2$ . Les vecteurs d'états  $X0, X1$  et  $X4$  décrivent les états de fonctionnement normal,  $X11, X14$  et  $X17$  correspondent à des défaillances du système et  $X2, X5, X7$  et  $X8$  se réfèrent à des états dégradés. Le chemin en rouge ( $X4, X5, X2, X11$ ) dans ce modèle comportemental générique correspond au modèle comportemental validé par les experts du Cemagref relatif au scénario de vieillissement du barrage de Cublize. Ce chemin traduit le colmatage du drain qui a provoqué le mécanisme d'érosion interne du barrage de Cublize.

### Modèle fonctionnel

Le modèle fonctionnel générique est construit à partir de la matrice  $E \times E = [e_i, e_j]$  : chacune des successions ( $e_i, e_j$ ) correspond aux affectations :  $x_i(t_k) = \delta_i$  et  $x_j(t_k) = \delta_j$ . Cela laisse supposer l'existence d'une fonction liant les valeurs  $\delta_i$  et  $\delta_j$  des variables  $x_i$  et  $x_j$  de la forme :  $x_j(t_k) = f_j(x_i)$ . La traduction de la matrice événement  $\times$  événement sous cette forme permet de spécifier les fonctions sous la forme de tables de valeurs (cf. Figure 12a) :  $Qs(t) = f1(V(t), R(t))$  et  $Qf(t) = f2(V(t))$ . Ces fonctions constituent le modèle fonctionnel générique (cf. Figure 12b).  $R(t)$  est une variable interne au processus permettant de discriminer la bonne valeur de  $Qs(t)$  parmi les différentes possibles.

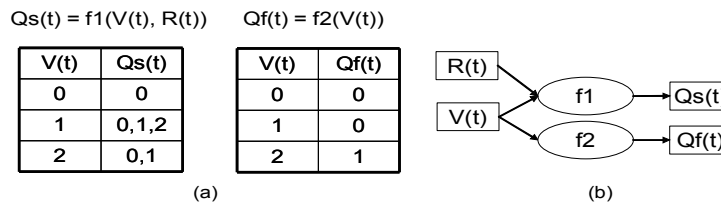


Figure 12. (a) Tables de valeurs associées et (b) Modèle fonctionnel

### Conclusion et perspectives

Ce papier introduit la méthode de modélisation TOM4D dirigée par les observations datées, visant à produire un modèle quadripartite du processus à diagnostiquer. Cette méthode exploite l'idée que les experts mènent leur raisonnement de diagnostic à partir de modèles implicites. L'intérêt d'expliciter ces modèles réside dans leur utilisation dans la tâche de diagnostic : ces modèles sont situés à un niveau d'abstraction adéquat pour un diagnostic sûr et efficace. Cette méthode de modélisation a été développée d'après l'histoire du barrage en remblai homogène de Cublize qui a subi un mécanisme d'érosion interne durant une dizaine d'années et est maintenant en cours de validation sur différents cas de barrage. Cette application de modélisation montre que les experts utilisent des modèles implicites et génériques qui peuvent être explicités. Dans l'état actuel de nos travaux, ces modèles prennent en compte un mécanisme de dégradation (le colmatage) et un mécanisme de rupture (l'érosion interne) et sont testés pour les autres mécanismes existants. Le scénario de vieillissement du barrage de Cublize est un des chemins possibles dans le modèle comportemental générique produit par la méthode TOM4D. D'autres exemples de barrage ont été testés, les modèles génériques ont permis de retracer les scénarios de vieillissement.



Nos travaux s'orientent aujourd'hui d'une part vers la validation des modèles sur l'ensemble des différents mécanismes et phénomènes de dégradation des barrages et d'autre part, sur la définition d'un algorithme de diagnostic capable d'utiliser les modèles issus de la méthodologie de modélisation TOM4D dans une tâche de diagnostic sûr et efficace. D'ores et déjà, on sait qu'à partir des indicateurs d'auscultation et quelques indicateurs visuels, il est possible de déterminer les valeurs des variables du verre à fond perméable c'est-à-dire V, Qs, Qf. Dès que les valeurs de ces trois variables sont renseignées, on peut déterminer l'état courant du barrage et la liste des phénomènes associés. À ce niveau, nous avons une liste de phénomènes possibles qui peut être précisée en utilisant les indicateurs de conception/réalisation et les indicateurs visuels qui n'ont pas encore été utilisés pour discriminer les phénomènes les plus probables. Chaque phénomène étant rattaché à des composants, on connaît alors les composants incriminés.

L'objectif est à terme d'obtenir un système d'aide au diagnostic capable d'analyser les observations datées et donc la cinétique des phénomènes afin d'envisager les scénarios de dégradation possibles et d'en déduire les actions de réparation préventive afin de maîtriser la sécurité des ouvrages en évitant les éventuelles ruptures et permettant un meilleur entretien du patrimoine.

### **Bibliographie**

- [1] Chittaro L., Guida G., Tasso C. et Toppano E. (1993). "Functional and teleological knowledge in the multimodeling approach for reasoning about physical systems: a case study in diagnosis." IEEE transactions on systems, Man and Cybernetics 23(6): 1718-1751.
- [2] Curt C., Peyras L., Royet P., Félix H., Degoutte G., Mériaux P., Tourment R. et Boissier D. (2006), Evaluation de la performance des barrages basée sur la formalisation de l'expertise, XXIVème Rencontres Universitaires de Génie Civil, La Grande Motte, France.
- [3] Le Goc M., Bouché P. et Giambiasi N. (2005). Stochastic Modeling of continuous Time Discrete Event Sequence for Diagnosis 16th International Workshop on Principles of Diagnosis DX'05, Pacific Grove, California, USA.
- [4] Le Goc, M. (2006). Notion d'Observation pour le Diagnostic des Processus Dynamiques: Application à Sachem et à la découverte de Connaissances Temporelles. Hdr, Faculté des Sciences et Techniques de Saint Jérôme, Marseille, France.
- [5] Masse E., Curt C. et Le Goc M. (2007). Développement d'une méthode pour la maîtrise de la sécurité des barrages Méthode basée sur le diagnostic multi modèles de systèmes dynamiques. AUGC 07, Bordeaux, France.
- [6] Masse E. et Le Goc M. (2007). Modeling Dynamic Systems from their Behaviour for a Multi Model Based Diagnosis Task. 18th International Workshop on Principles of Diagnosis DX'07, Nashville, Tennessee, USA.
- [7] Peyras L. (2003). Diagnostic et analyse de risques liés au vieillissement des barrages, développement de méthodes d'aide à l'expertise. Thèse, Université Blaise Pascal-Clermont, France.
- [8] Reiter R., « A theory for Diagnosis from First Principles », Artificial Intelligence 32, P 57-95, 1987
- [9] Rosenberg R. C., Karnopp D. C., (1983), Introduction to Physical System Dynamics. McGraw-Hill, Inc. New York, NY, USA
- [10] Schreiber A. Th., Akkermans J. M., Anjewierden A. A., de Hoog R., Shadbolt N. R., Van de Velde W., Wielinga B. J., Publication, « Knowledge Engineering and Management, The CommonKADS methodology », MIT Press, 2000.
- [11] Zanni C., Le Goc M., Frydman C., Publication, « A conceptual framework for the analysis, Classification and choice of knowledge-based diagnosis systems », International Journal of Knowledge-Based & Intelligent Engineering Systems (KES Journal), IOS Press Eds., 41 p., 2005.